

На правах рукописи



БОНДАРЕНКО
Денис Андреевич

**АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ
ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ТЕПЛОВОЗА**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Брянск
2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Брянский государственный технический университет» на кафедре «Подвижной состав железных дорог»

Научные
руководители:

Михальченко Георгий Сергеевич,

доктор технических наук, профессор.

Воробьев Владимир Иванович,

кандидат технических наук, доцент.

Официальные
оппоненты:

Щербаков Виктор Гаврилович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кафедра «Электромеханика и электрические аппараты», профессор

Хазов Максим Сергеевич, кандидат технических наук, акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», ведущий научный сотрудник

Ведущая
организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Защита состоится «12» сентября 2018 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» (РУТ(МИИТ)) по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр.9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РУТ (МИИТ) и на сайте: www.mii.ru

Автореферат разослан « » июля 2018 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета Д 218.005.02

Гречишников Виктор Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Железнодорожный транспорт представляет собой основной вид транспорта России, его технический уровень и состояние определяют экономическую эффективность и безопасность перевозок. В настоящее время при создании современных тепловозов с электрической передачей наметилась тенденция использовать тяговый асинхронный двигатель (ТАД). Применение ТАД с короткозамкнутым ротором, обладающих рядом известных преимуществ по сравнению с тяговыми двигателями постоянного тока, способствует повышению надежности и экономичности тепловозов, улучшает их тяговые качества. Вместе с тем неисправная работа, либо выход из строя ТАД приводит не только к его ремонту или замене, но и к значительным финансовым расходам в связи с неопределенным временем простоя тепловоза. Анализ данных различных исследований, позволил сделать вывод, что существенное число неисправностей двигателей прямым или косвенным образом связано с повышенным нагревом его элементов.

Рост температуры в узлах двигателя приводит к увеличению его потерь, тем самым снижая КПД до $89 \div 77\%$ при изменении температуры в диапазоне $0 \div 160^\circ\text{C}$. Кроме того изменяется жесткость механической характеристики ТАД, что делает возможным возникновение процессов боксования, что приводит к изменению тяговых свойств тепловоза. Таким образом возникает необходимость учета влияния температуры ТАД в передачах мощности тепловозов. Кроме того одним из резервов повышения экономичности тепловоза и увеличения его силы тяги является сокращение затрат мощности на вспомогательные нужды (насосы, компрессор, вентиляторы охлаждения и т. д.), которые составляют $8 \div 17\%$ и более от общей мощности тепловоза. В настоящее время проблема плавного (непрерывного) управления температурой тяговых электродвигателей подвижного состава, эксплуатируемого в России недостаточно проработана. Таким образом, возникает необходимость решения *актуальной* задачи – разработки автоматической системы управления температурой (АСУТ) ТАД.

В диссертации рассмотрены теоретические и экспериментальные исследования по созданию АСУТ тепловоза с исполнительным устройством в виде частотно-управляемого электропривода вентилятора охлаждения.

Степень разработанности темы. Исследованиями систем охлаждения (СО) тягового электрооборудования, автоматических регуляторов и АСУТ в электрических передачах локомотивов занимались: А. В. Грищенко, Е. С. Дорохина, А. А. Зарифьян, А. С. Захарчук, А. Н. Качанов, Г. Ф. Кашников, И. Г. Киселев, А. С. Космодамианский, В. Д. Кузьмич, Ю. А. Куликов, А. С. Курбасов, Н. М. Луков, Е. Ю. Логинова, Ю. И. Миловидов, В. А. Петраков, А. А. Петрожицкий, О. Л. Рапопорт, В. И. Рахманинов, А. Н. Савоськин, В. Л. Сергеев, В. В. Стрекопытов, Ф. В. Тихонов, С. В. Торба, В. В. Чащин Л. А. Чернышов, Е. Б. Черток, О. В. Цурган, G. Kylander, M. Mahmoudi, A. A. Melnik, L. Popova, и др.

Цель и задачи. Целью данной работы является разработка АСУТ ТАД тепловоза, содержащей частотно-управляемый электропривод вентилятора охлаждения как исполнительное устройство для плавного управления температурой в широком диапазоне.

Для достижения поставленной в работе цели решены следующие задачи:

- разработана математическая модель теплового состояния тягового асинхронного двигателя в стационарном и нестационарном режимах;
- исследованы статические и динамические свойства тягового асинхронного двигателя как объекта управления температурой и частотно-управляемого электропривода вентилятора охлаждения как исполнительного устройства;
- разработана и исследована автоматическая система управления температурой тягового асинхронного двигателя тепловоза, в которой применен электропривод вентилятора охлаждения с преобразователем частоты как исполнительное устройство;
- синтезирован регулятор температуры, состоящий из двух изодромных звеньев и звеньев обратной связи, обеспечивающий требуемые значения запасов устойчивости и показателей качества управления, а также ПИ-регулятор, обеспечивающий настройку системы на технический оптимум;

- разработана и изготовлена физическая модель тягового асинхронного двигателя, система охлаждения тягового асинхронного двигателя с возможностью реализации на ней экспериментальных исследований процессов нагрева и охлаждения;

- проведен расчет технико-экономической эффективности применения разработанной автоматической системы управления температурой на тепловозе.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель АСУТ ТАД, описывающая работу всех звеньев, входящих в её состав;

- решена задача синтеза автоматического регулятора с астатизмом второго порядка и звеньями обратной связи управления температурой для линеаризованной модели АСУТ ТАД;

- разработан ПИ-регулятор с настройкой на технический оптимум;

- выполнены расчёты переходных процессов с двумя указанными типами регуляторов для линеаризованной и нелинейной моделей АСУТ ТАД;

- разработан и изготовлен стенд, содержащий физическую модель ТАД и систему его охлаждения.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- разработаны математические модели всех звеньев, входящих в АСУТ ТАД, включая модель теплового состояния ТАД позволяющую исследовать распределение температуры в 53 узлах двигателя в различных режимах работы;

- разработан регулятор с астатизмом второго порядка и звеньями обратной связи АСУТ ТАД, применение которого позволяет плавно управлять температурой ТАД в широком диапазоне с достаточно стабильными значениями показателей качества управления;

- разработан физический стенд, на базе которого возможно проводить широкий спектр экспериментальных исследований температурных режимов двигателя.

Методы исследований. При решении поставленных задач в диссертации использованы методы расчета тепловых полей электродвигателей, теории автоматического управления и электропривода. Выполнено численное интегрирование системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих работу системы при различных начальных значениях температуры и разных скачках задающего воздействия. Математическое моделирование проведено в программном пакете Matlab – Simulink. Экспериментальные исследования были проведены на разработанном стенде физического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель теплового состояния ТАД, применение которой позволяет определить распределение температуры в 53 узлах двигателя при различных режимах его работы;
- структура, принцип работы и динамические свойства АСУТ ТАД, обеспечивающие плавное управление температурой ТАД;
- структура и принцип работы разработанного стенда, содержащего физическую модель ТАД и систему его охлаждения.

Степень достоверности результатов. Достоверность подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов расчетов с данными экспериментальных испытаний, проведенных на разработанном стенде физического моделирования. Расхождение результатов между теоретическими и экспериментальными исследованиями при определении времени переходного процесса во всех выделенных элементах ТАД не превышает 3%, при определении установившегося значения температуры в этих узлах – 6 %.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на научно-технических и научно-практических конференциях: международной научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение XXI век» (ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» Госуниверситет – УНПК, 2013 г.), VII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014 г.), V и VI международная научно-практическая конференция «Достижения молодых ученых в развитии инновационных

процессов в экономике, науке и образовании» (БГТУ, 2014 г.), заседании учебно-методической комиссии совмещенной с научно-технической конференцией, проводимой совместно с ЗАО «УК БМЗ» (БГТУ, 2014 г.), II Международной (V Всероссийской) научно-технической конференции «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий» (УГНТУ, 2015 г.), III Международной научно-технической конференции, посвящённой 85-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора В.В. Стрекопытова «Локомотивы. XXI век» (ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015 г.), заседании кафедры «Подвижной состав железных дорог» (БГТУ, 2015 г.), заседании кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» (ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017 г.), 7-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные инновации в науке и технике» (ЮЗГУ, 2017 г.).

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследований использовались при выполнении госбюджетной НИР № 1.02.09 (06/47) «Разработка конструкций, математическое моделирование и испытание узлов транспортных машин» в 2014 – 2015 г. на кафедре «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета (БГТУ). Основные результаты работы использовались: в научных проектах РФФИ № 14-08-31274 (2014 – 2015 гг.) и Фонда содействия инновациям № 4701ГУ1/2014 (2014 г.), а также внедрены и используются в БГТУ на кафедре «Подвижной состав железных дорог» при подготовке студентов очной и заочной форм обучения по специальности 190300 – «Подвижной состав железных дорог».

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликовано 13 научных трудов, в этом числе: два патента на полезную модель №148359 и №156446, пять статей в изданиях, рекомендуемых ВАК: «Наука и техника транспорта», №3 2014 г., «Вестник Брянского государственного университета», №2 2015 г., №3 2015 г., «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии», №5-2 2015 г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения с основными результатами и выводами, списка использованных источников из 143 наименований, шести приложений и содержит 175 страниц основного текста, 87 рисунка и 10 таблиц.

Автор благодарит кафедру «Электропоезда и локомотивы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)», научного руководителя В.И. Воробьева и коллектив кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечена актуальность совершенствования тягового подвижного состава, и в первую очередь, его вспомогательного электрооборудования.

Сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследований, положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов исследований, приводятся сведения о реализации и апробации работы, публикациях, структуре и объеме диссертации.

В первой главе выполнен обзор существующих приводов вентиляторов системы охлаждения (СО) тягового электрооборудования эксплуатируемого парка тепловозов. Отмечено, что большая часть парка не оснащена управляемым приводом вентиляторов таких СО.

Установлено, что наилучшими технико-экономическими показателями обладают электроприводы с частотно-управляемыми асинхронными двигателями, которые позволяют плавно управлять частотой вращения вала вентилятора охлаждения и, соответственно, температурой ТАД.

Во второй главе на базе эквивалентной тепловой схемы (ЭТС) замещения разработана математическая модель теплового состояния физической модели ТАД, состоящая из 53 узлов, представленная на рисунке 1.

Схема состоит из 53 узлов, из которых 31 является активным, то есть тепло-выделяющим, а оставшиеся 22 – пассивными узлами (рисунок 2).

Общий вид дифференциального уравнения, описывающего тепловое состояние для i -го узла двигателя имеет вид

$$C_i \frac{\partial \theta}{\partial t} = P_i - \frac{\theta_i}{R_{i,i}} - \sum_{j=1}^n \frac{\theta_i - \theta_j}{R_{i,j}}, \quad i = 1 \dots n. \quad (1)$$

На основании (1) были синтезированы 53 дифференциальных уравнения, применительно к ЭТС, приведенной на рисунке 2.

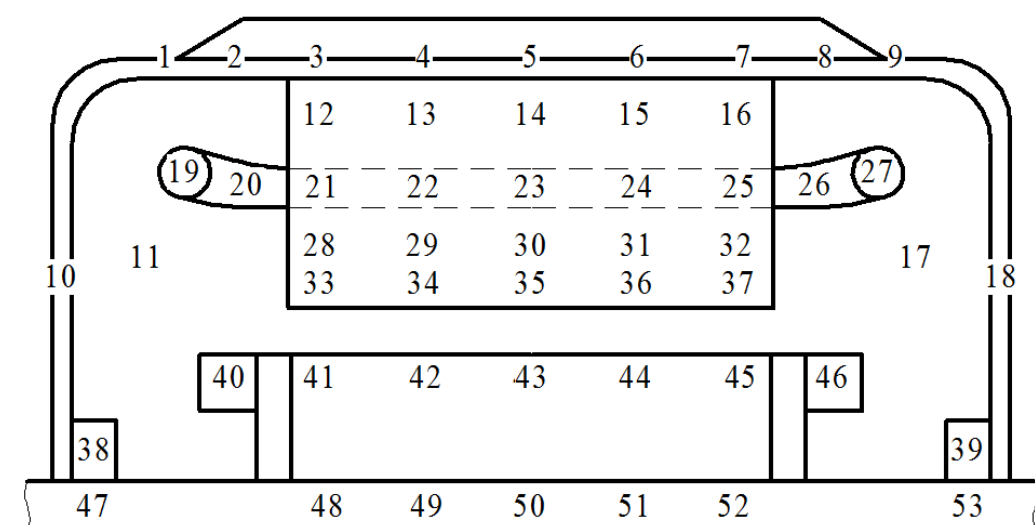


Рисунок 1 – Эскиз физической модели ТАД

Определение мощности потерь в активных узлах двигателя осуществлялось на основе моделирования ТАД с использованием Т-образной схемы замещения двигателя с приведением параметров ротора к параметрам статорной обмотки и заменой механической нагрузки двигателя переменным активным сопротивлением. При этом учитывались такие нелинейности как насыщение по главному магнитному пути, эффект вытеснения тока в обмотке (стержнях) ротора, нелинейная зависимость потери в стали статора от частоты тока статора.

На основании конструкции, геометрических размеров ТАД и его элементов, массы и свойств материалов синтезированы формулы для расчета тепловых сопротивлений узлов.

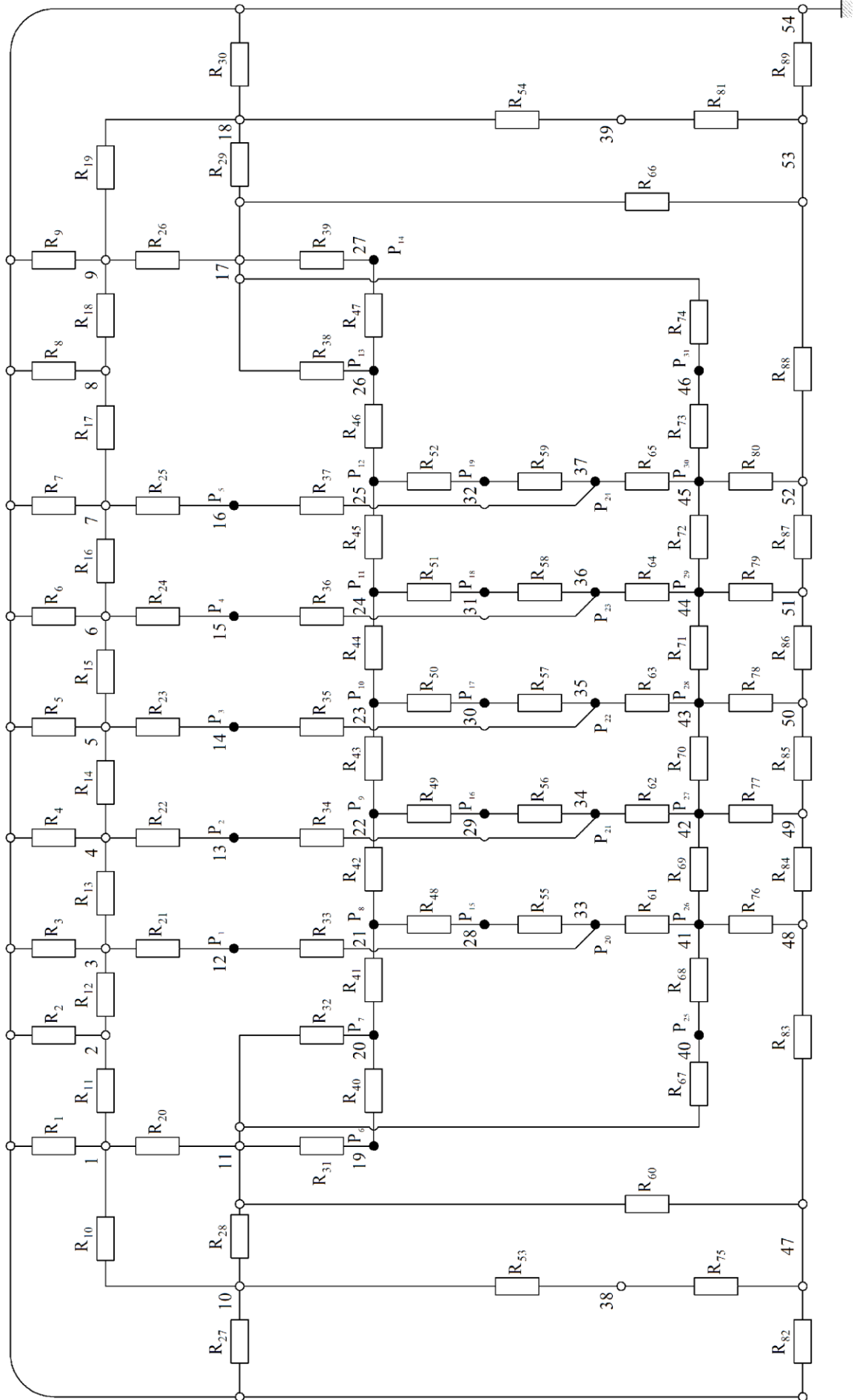


Рисунок 2 – ЭТС двигателя

Для исследования динамических тепловых процессов двигателя в структуру ЭТС включены теплоемкости ее элементов. Фрагмент ЭТС с учетом теплоемкостей элементов, приведен на рисунке 3.

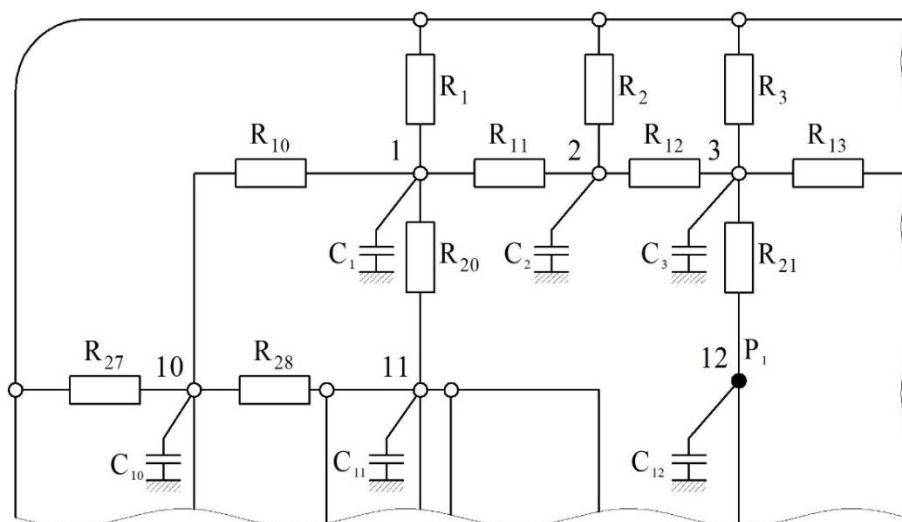


Рисунок 3 – Фрагмент динамической ЭТС

Теплоемкость i -го элемента двигателя вычисляется следующим образом

$$C_i = \sum_{j=1}^n m_j \cdot c_j, \quad (2)$$

где m_j – масса элемента, кг,

c_j – удельная теплоемкость материала, из которого изготовлен элемент двигателя, Дж/кг·К.

Теплоемкости элементов рассчитаны, исходя из массы и свойств материалов. Индекс i в выражении 2 указывает на различные материалы, из которых изготовлен элемент двигателя.

Результаты компьютерного моделирования в программном пакете Matlab Simulink, представленные на рисунке 4, показали, что наибольший перегрев испытывает пазовая часть обмотки статора на расстоянии $2/3$ от входа охлаждающего воздуха, следующим по величине нагрева идет обмотка (стержни) ротора на том же расстоянии; разница в температуре между пазовой частью обмотки статора и стержнями ротора составляет $2...10^\circ\text{C}$ при отсутствии охлаждения и $1,5...6^\circ\text{C}$ при расходе охлаждающего воздуха $G_{\text{вз}} = 0,95 \text{ м}^3/\text{с}$ в диапазоне токов статора $0,5...1,1 I_{\text{ном}}$.

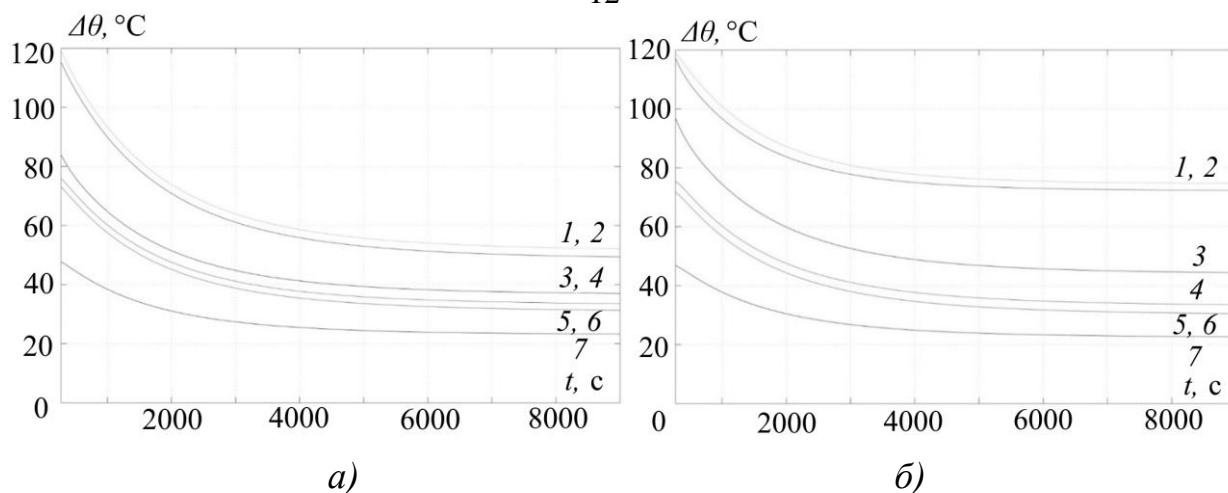


Рисунок 4 – Кривые охлаждения узлов двигателя в поперечном сечении со стороны охлаждающего воздуха *а)* и на расстоянии 2/3 длины статорной обмотки *б)* при $0,5I_{\text{ном}}$

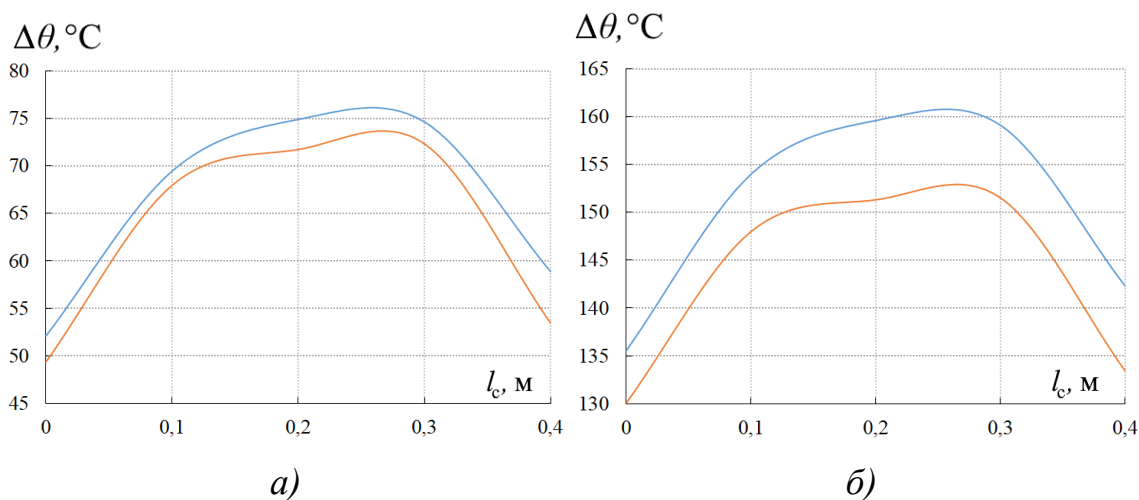


Рисунок 5 – Распределение температур по длине обмотки статора *1* и ротора *2* при $I_s = 0,7 I_{\text{ном}}$ $I_s = 1,1 I_{\text{ном}}$

На рисунке 5 представлены графики распределения температуры по длине обмотки статора и ротора.

Время переходного процесса нагревания/охлаждения для всех выделенных узлов ТАД примерно одинаково и отличается не более чем на 5...10%.

Наибольшая температура исследуемого ТАД достигается в пазовой части обмотки статора на расстоянии 2/3 длины со стороны подачи охлаждающего воздуха, и она быстрее всего достигнет критического значения, поэтому управление охлаждением достаточно выполнить по этому узлу, нагрев которого можно представить нелинейным однородным дифференциальным уравнением:

$$T_\theta \frac{d\theta}{dt} + \theta = f(G_{\text{вз}}), \quad (3)$$

где θ – текущая температура ТАД, °C;

t – текущее время, с.

Зависимость $\theta = f(G_{\text{вз}})$, полученная во втором разделе, может быть аппроксимирована выражением:

$$\theta = B_{0-2} G_{\text{вз}}^2 + B_{0-1} G_{\text{вз}} + B_{0-0}, \quad (4)$$

где $B_{0-2} = 78,125(^{\circ}\text{Cm}^6 / \text{с})$; $B_{0-1} = -248,75(^{\circ}\text{Cm}^3 / \text{с})$; $B_{0-0} = 242^{\circ}\text{C}$.

Выполнив линеаризацию зависимости (4) для выбранной рабочей точки и подставив ее в выражение (3) можно получить передаточную функцию ТАД в составе АСУТ, которая соответствует апериодическому (инерционному) звену I порядка.

В третьей главе разработана АСУТ, содержащая задающее устройство – пульт управления, устройство управления – микропроцессорная система, реализующая принятый тип регулятора и преобразующая выходную координату регулятора в сигнал управления исполнительным элементом, исполнительное устройство – преобразователь частоты, асинхронный двигатель (АД) с системой скалярного управления по закону $u / f^2 = \text{const}$, приводящий во вращение вентилятор охлаждения (ВО), объект управления – тепловое состояние ТАД, измерительное устройство – датчик температуры. Для синтеза АСУТ выполнена линеаризация всех его перечисленных элементов.

В результате анализа режимов работы, электромеханических и тепловых характеристик асинхронных двигателей установлено, что асинхронный двигатель, приводящий во вращение вентилятор охлаждения целесообразно представить безинерционным звеном.

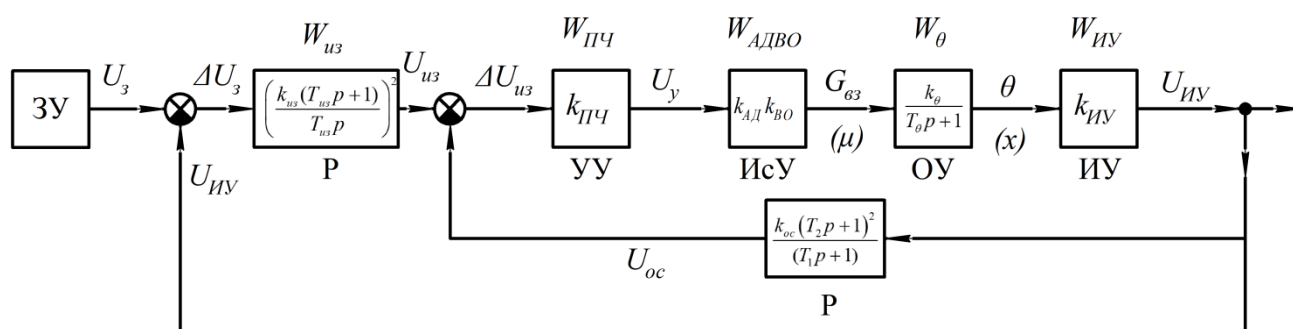
Все тепловые процессы ТАД при синтезе АСУТ рассмотрены применительно к пазовой части обмотки его статора, как наиболее нагретого элемента двигателя. Используя методику Орманна было определено, что переходные тепловые процессы, протекающие ТАД могут быть удовлетворительно аппроксимированы динамическим звеном первого порядка.

Для синтеза систем автоматического управления (САУ), используемых в подвижном составе наиболее предпочтительна комбинированная коррекция, когда часть звеньев включается последовательно с разомкнутой САУ, а другая часть в

обратную связь. Наряду с этим в последнее время широкое распространение получили ПИ-регуляторы, которые включаются последовательно с объектом управления и представляют собой параллельное включение усилительного и интегрирующего звеньев. В связи с этим для АСУТ предложены две схемы ее коррекции.

Первая схема коррекции подразумевает комбинированное включение корректирующих звеньев. При этом часть корректирующих звеньев включается последовательно с разомкнутой системой – это два изодромных звена обеспечивающие структурную устойчивость АСУТ и нулевые ошибки по положению и по скорости, а другая часть в обратную связь, обеспечивающую необходимый уровень запасов устойчивости и показателей качества управления. Структурная схема такой АСУТ представлена на рисунке 6. Для определения параметров корректирующих звеньев при комбинированной коррекции линеаризованной АСУТ в работе используется метод синтеза по логарифмическим амплитудным частотным характеристикам (ЛАЧХ).

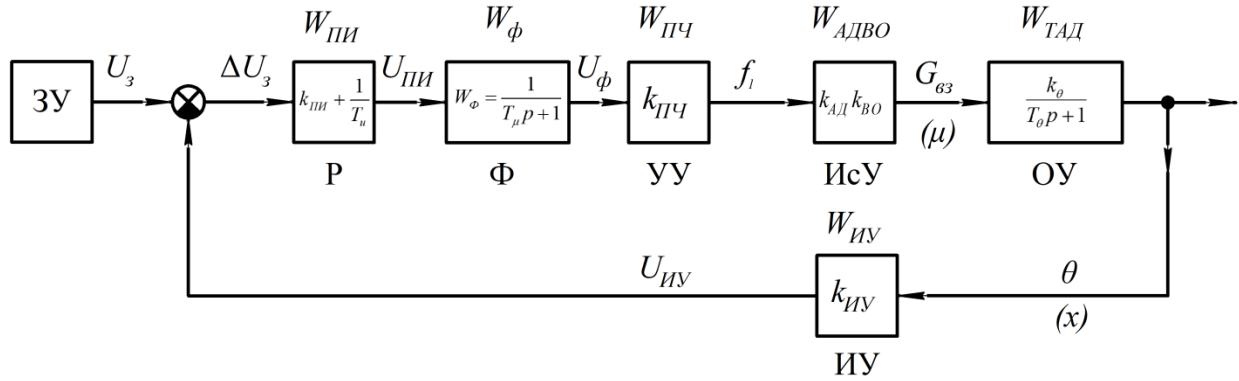
Применение звеньев обратной связи помимо обеспечения устойчивости и качества управления в переходном режиме снижает влияние нелинейности и нестационарности охваченной части системы.



$W_{ПЧ}$, $W_{АДВО}$, W_{θ} , $W_{ИУ}$ – передаточные функции устройства управления (преобразователя частоты), исполнительного устройства (электропривода вентилятора охлаждения), объекта управления (тепловое состояние ТАД) и измерительного устройства (датчика температура); $W_{из}$ и W_{oc} – передаточные функции регулятора комбинированной коррекции; $k_{из}$, $k_{ПЧ}$, $k_{Ад}$, $k_{во}$, k_{θ} , $k_{ИУ}$ и k_{oc} – коэффициенты усиления функциональных элементов АСУТ; $T_{из}$, T_{θ} , T_1 и T_2 – постоянные времени функциональных элементов

Рисунок 6 – Структурная схема комбинированной коррекции АСУТ

Вторая схема коррекции АСУТ, приведенная на рисунке 7, предполагает использование ПИ-регулятора и включенного последовательно с ним фильтра низких частот. Параметры ПИ-регулятора были определены методом интегральной оценки. При таком подходе обеспечивается настройка системы на технический оптимум.



$W_{\text{ПИ}}$ и $W_{\text{Ф}}$ – передаточные функции ПИ-регулятора и фильтра; $k_{\text{ПИ}}$ – коэффициенты усиления ПИ-регулятора; $T_{\text{и}}$ и T_{μ} – постоянная времени интегрирования и наименьшая некомпенсируемая постоянная времени соответственно

Рисунок 7 – Структурная схема АСУТ с ПИ-регулятором

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta U_3 = U_3 - U_{\text{иу}}, \\ U_{\text{из}} T_{\text{из}}^2 \frac{d^2 U_{\text{рег}}}{dt^2} = k_{\text{из}}^2 \left(T_{\text{из}}^2 \frac{d^2 U_3}{dt^2} + 2 T_{\text{из}} \frac{dU_3}{dt} + U_3 \right), \\ \Delta U_{\text{БО}} = \begin{cases} U_{\text{рег}} - U_{\text{ос}}, & \text{при } U_{\text{рег}} \leq U_{\text{рег}}^{\text{max}}, \\ U_{\text{рег}}^{\text{max}} - U_{\text{ос}}, & \text{при } U_{\text{рег}} > U_{\text{рег}}^{\text{max}}. \end{cases} \\ f_1 = k_{\text{ПЧ}} U_{\text{БО}}, \\ G_{\text{вз}} = k_{\text{ИсУ}} f_1, \\ T_{\theta} \frac{d\theta}{dt} + \theta = 156,25 G_{\text{вз}} - 248,75, \\ U_{\text{ИУ}} = k_{\text{ИУ}} \theta. \\ U_{\text{ос}} \left(T_1 \frac{dU_{\text{иу}}}{dt} + 1 \right) = k_{\text{ос}} \left(T_2 \frac{dU_{\text{иу}}}{dt} + 1 \right)^2. \end{array} \right. \quad (5)$$

Для определения показателей качества управления в разработанной нелинейной АСУТ необходимо выполнить численное интегрирование системы нелинейных дифференциальных уравнений, которая будет учитывать нелинейность

изменения коэффициента усиления ТАД как объекта управления температурой и дополнена уравнением, которое учитывает ограничение выходного напряжения регулятора $U_{из}$. Это необходимо для того, чтобы не превышалось максимально допустимое значения частоты вращения вала исполнительного устройства (вентилятора охлаждения) и подачи охлаждающего воздуха при различных начальных условиях и при разных скачках задающего воздействия. В итоге система уравнений нелинейной АСУТ была записана в виде:

Полученная система дифференциальных уравнений (5) решалась методом численного интегрирования в программном пакете Matlab Simulink.

На рисунке 8 приведены графики переходных процессов в линеаризованной АСУТ при использовании комбинированного регулятора (КР) (а) и с использованием ПИ-регулятора (б) при начальной температуре ТАД $\theta_{нач} = 160^\circ\text{C}$ и различных токах статора ТАД $I_s^* = I_s / I_{s\text{ ном}}$.

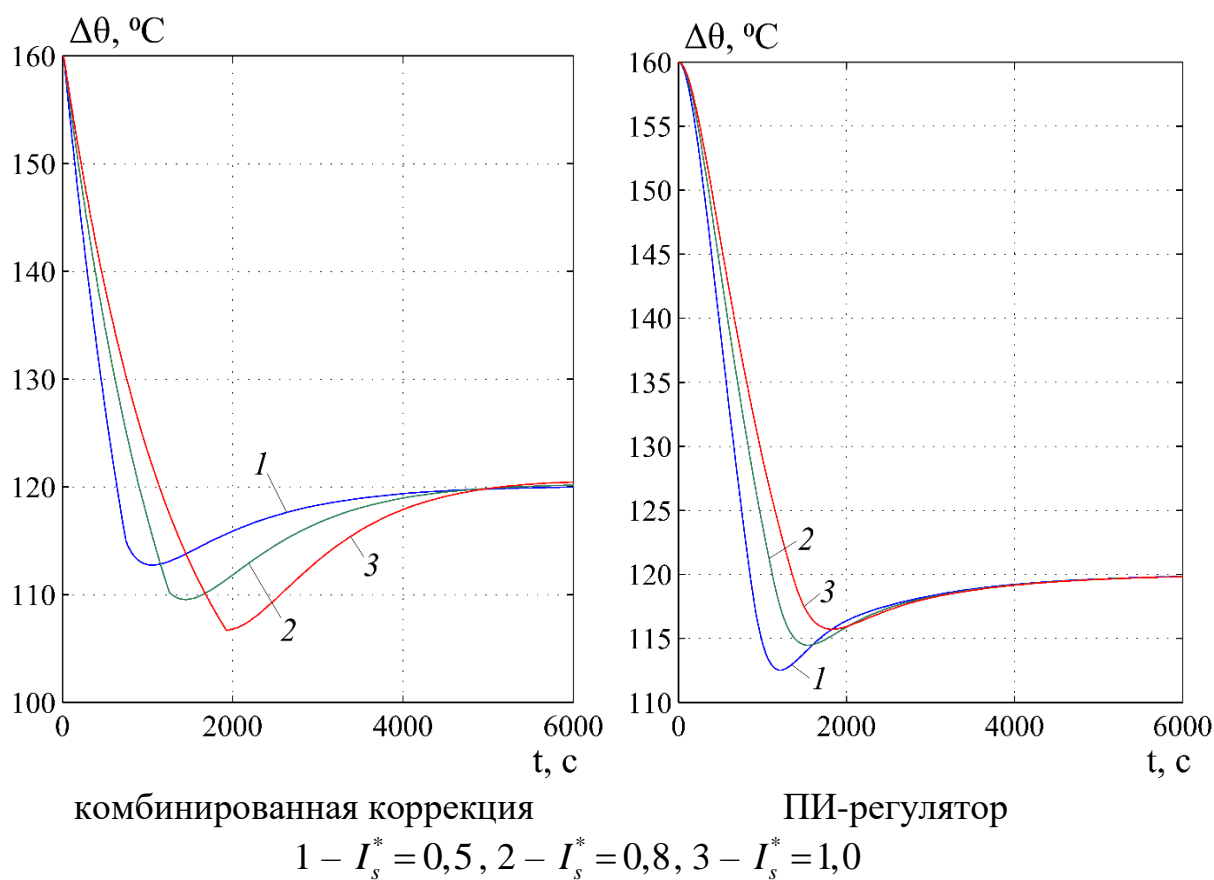


Рисунок 8 – Переходные процессы в АСУТ при $\theta_{нач} = 160^\circ\text{C}$

Установлено, что применение обоих вариантов АСУТ ТАД позволяет плавно управлять температурой в диапазоне $20 \div 160$ С. При применении как КР, так и при использовании ПИ-регулятора перерегулирование σ и время управления t_p в замкнутой АСУТ увеличивается с ростом задания на температуру.

С ростом начальной температуры $\theta_{\text{нач}}$ перерегулирование уменьшается, а время управления растет. Чем выше ток нагрузки I_s ТАД, тем меньше перерегулирование и выше время управления. Для АСУТ ТАД с КР $t_p = 938 \dots 3014$ с и $\sigma = 6,2 \dots 18,7\%$, а для АСУТ ТАД с ПИ-регулятором $t_p = 817 \dots 3178$ с и $\sigma = 8 \dots 24\%$. Таким образом, критерии качества процессов управления АСУТ ТАД с КР в меньшей степени зависят от режимов работы АСУТ чем критерии качества процессов управления АСУТ с ПИ-регулятором.

В четвертой главе приведена конструкция (рисунок 9) и особенности стенда для моделирования динамических процессов в тяговом приводе локомотивов с электропередачей. Проведены экспериментальные исследования подтверждающие результаты, полученные во второй и третьей главах.

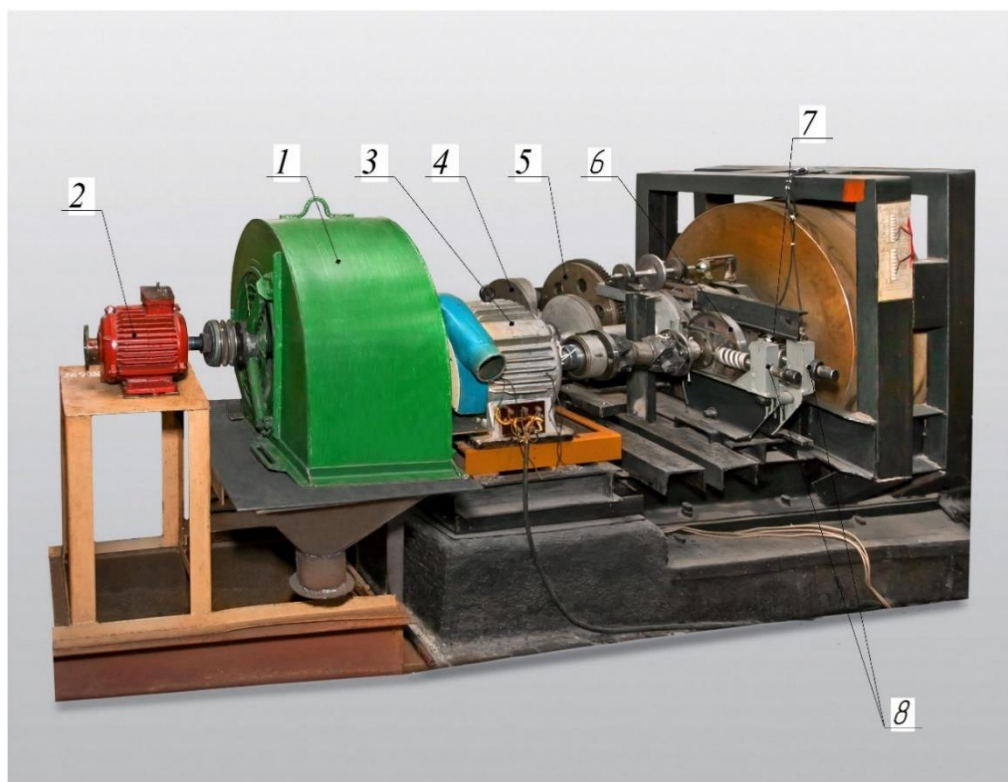


Рисунок 9 – Общий вид установки для исследования АСУТ ТАД

Основными элементами стенда являются вентилятор охлаждения 1, который приводится во вращение асинхронным двигателем 2, управляемого преобразователем частоты и охлаждаемый асинхронный двигатель 3 (физическая модель ТАД тепловоза), который управляется преобразователем частоты 11. Вентилятор охлаждения соединяется с охлаждаемым асинхронным двигателем (физической моделью ТАД тепловоза) через гибкий патрубок (на рисунке 9 не показан).

В механическую часть установки входят модель колесной пары 4, на которой располагается зубчатое колесо 5; устройство, для связи колесной пары с рельсами, изготовленное в виде двух связанных между собой катков 6; маховика 7, который позволяет моделировать массу поезда. При помощи прижимных винтовых устройств 8 регулируется величина силы нажатия колесной пары 4 на каток 6.

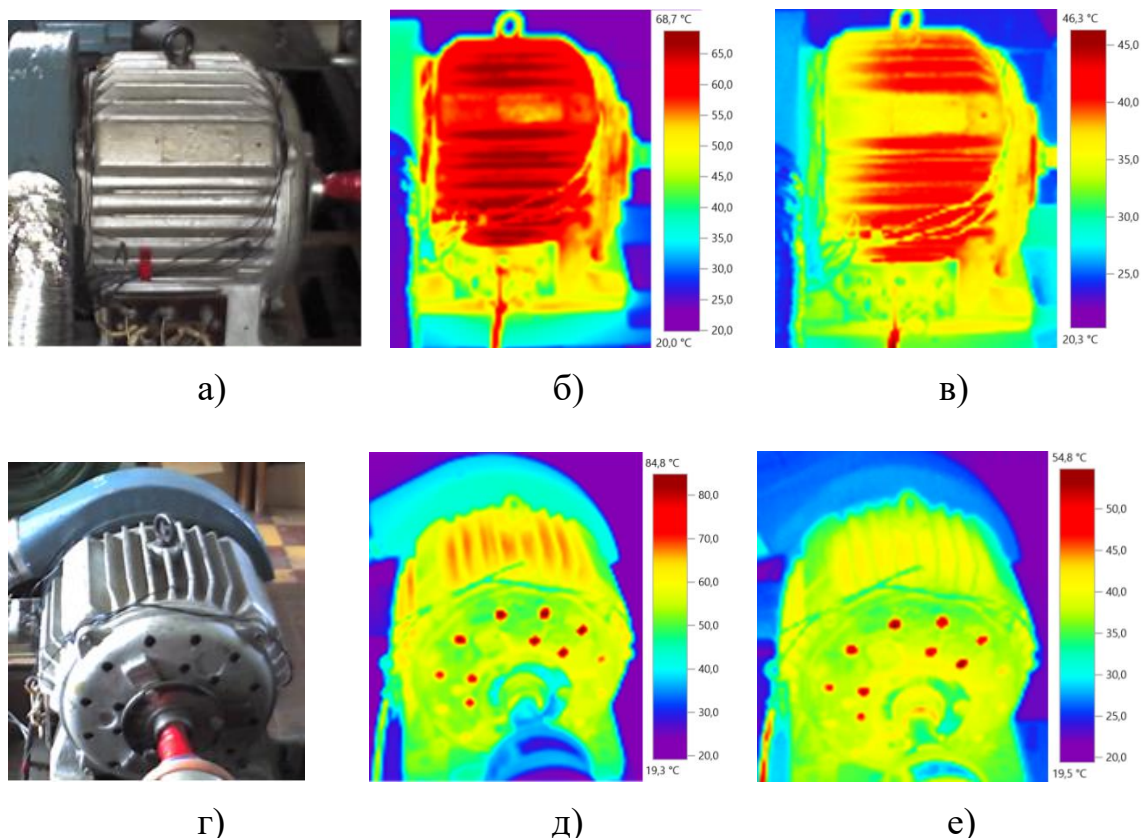


Рисунок 10 – Результаты тепловизионной съемки: фотографии двигателя (а, г), термограммы при токе статора $I_s = 15A$, частоте тока статора $f_l = 10Гц$, частоте вращения вала ротора $n = 272мин^{-1}$ без принудительного охлаждения (б, д) и при расходе охлаждающего воздуха $G_{вз} = 0,95м^3/с$ (в, е)

На рисунке 10 приведены общий вид и термограммы двигателя с радиальной подачей охлаждающего воздуха в установившемся тепловом режиме посредством портативного тепловизора Testo 875i, обладающего температурной чувствительностью 50мК при 30°C .

Сравнительные параметры качества управления АСУТ с ПИ-регулятором, полученные в ходе моделирования и на экспериментальном стенде приведены в таблице 1.

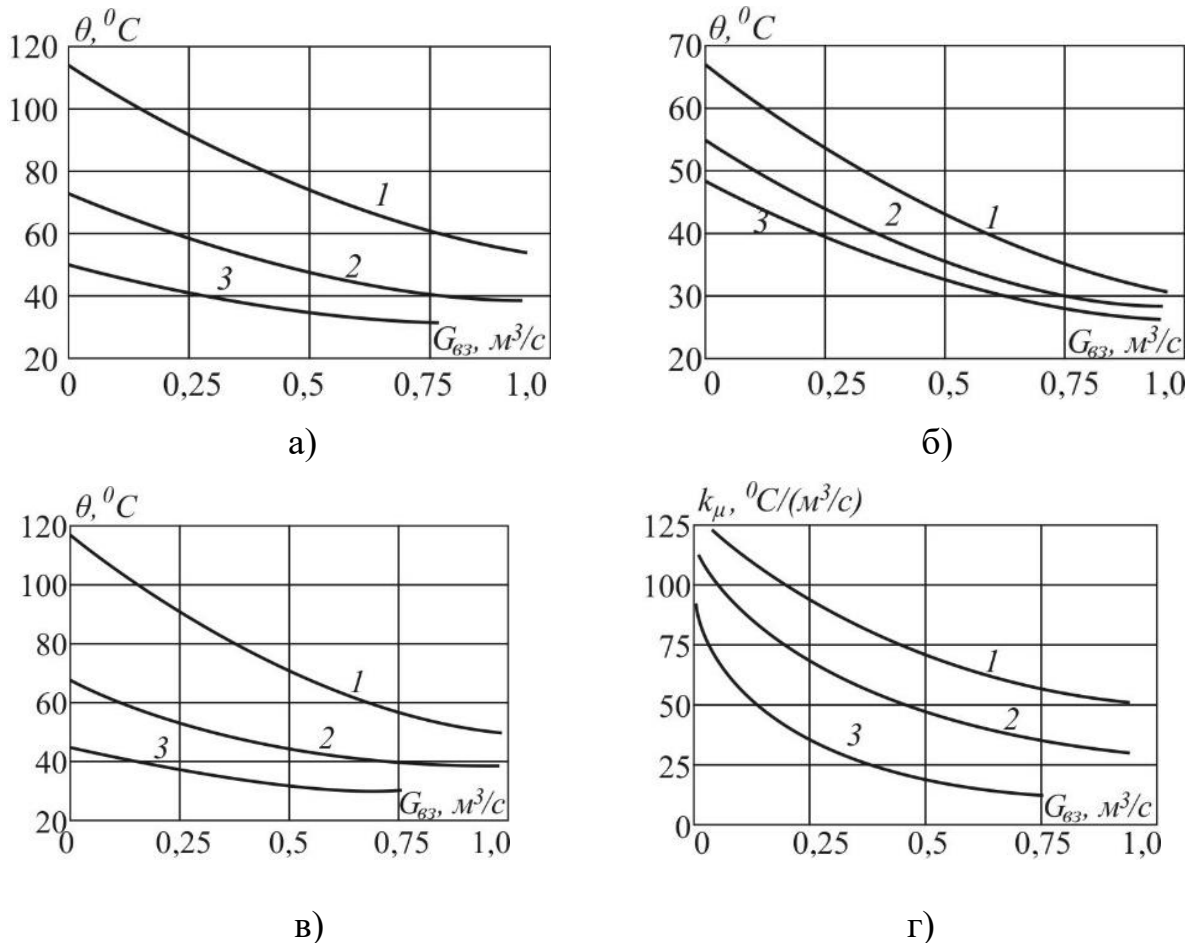
Таблица 1

Сравнительные параметры качества управления АСУТ с ПИ-регулятором

Тип АСУТ	Время переходного процесса t_p , с	Перерегулирование σ , %	Крутизна переднего фронта $dy(t)/dt$,
Моделирование	3178	24	$7,17 \cdot 10^{-2}$
Эксперимент	3489	11	$5,82 \cdot 10^{-2}$
Относительная раз-ница, %	7	13	23,19

Анализ статических режимов работы, приведенных на рисунке 11 показывает, что наибольший перегрев испытывает пазовая часть обмотки статора на расстоянии $2/3$ со стороны подачи охлаждающего воздуха. Вторым по величине перегрева узлом ТАД является обмотка (стержни) ротора. При этом с увеличением частоты тока статора разница в превышении температур между обмоткой статора и ротора становится больше (при $f_l = 7,5\text{Гц}$ максимальное превышение температуры пазовой части обмотки статора на расстоянии $2/3$ длины со стороны подачи охлаждающего воздуха над обмоткой ротора на той же длине составляет 2°C , при $f_l = 10\text{Гц}$ – 4°C). Таким образом, в большем диапазоне рабочих режимов ТАД наиболее теплонагруженным элементом является пазовая часть обмотки статора на расстоянии $2/3$ со стороны подачи охлаждающего воздуха, что указывает на необходимость использования значения ее температуры как лимитирующего фактора при синтезе АСУТ.

Проведенные экспериментальные исследования процессов нагрева и охлаждения ТАД, которые подтвердили адекватность разработанной математической модели. Расхождение результатов между теоретическими и экспериментальными исследованиями при определении времени переходного процесса во всех выделенных элементах ТАД не превышает 3%, при определении значения температуры в этих узлах – 6%.



а) – обмотка (стержни) ротора на расстоянии 2/3 со стороны подачи охлаждающего воздуха при $f_l = 5\text{Гц}$; б) – массива статора в среднем сечении при $f_l = 5\text{Гц}$; в) – пазовая часть обмотки статора на расстоянии 2/3 со стороны подачи охлаждающего воздуха при $f_l = 10\text{Гц}$; г) – зависимости коэффициента усиления пазовой части обмотки статора на расстоянии 2/3 со стороны подачи охлаждающего воздуха при $f_l = 10\text{Гц}$
 (1 – $I_s = 22\text{А}$; 2 – $I_s = 15\text{А}$; 3 – $I_s = 10\text{А}$)

Рисунок 11 – Статические характеристики системы охлаждения ТАД

В пятой главе выполнена технико-экономическая оценка эффективности применения разработанной АСУТ ТАД для автономного локомотива мощностью 2200кВт . Использование электропривода с частотно-управляемым асинхронным двигателем по сравнению с релейной системой может дать выигрыш по средне-эксплуатационным потерям $18,11\text{кВт}$. Экономия потребления электроэнергии в этом случае за год работы составит $54330\text{кВт}\cdot\text{ч}$. При среднем удельном расходе топлива $0,208\text{кг}/\text{кВт}\cdot\text{ч}$ экономия топлива в случае применения электропривода с частотно-управляемым асинхронным двигателем 11300кг в год на систему охлаждения тяговых электродвигателей по сравнению с релейной системой управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для адекватного описания тепловых процессов в ТАД целесообразно использовать модель, которая базируется на методе эквивалентных тепловых схем замещения. Разработанная математическая модель для исследования установившихся и переходных тепловых процессов ТАД позволяет регистрировать превышения температур в пятидесяти трех узлах двигателя, тридцать один из которых, являются активными источниками тепла.

2. Поскольку наибольшая температура ТАД достигается в пазовой части обмотки статора на расстоянии $2/3$ длины со стороны подачи охлаждающего воздуха, то для описания процесса нагревания этого элемента достаточно использовать однородное нелинейное дифференциальное уравнение. Процессы нагревания и охлаждения исследуемого ТАД имеют большую инерционность (постоянная времени $T_{\theta} \approx 1300\text{с}$), поэтому для описания работы асинхронного двигателя привода вентилятора охлаждения и самого вентилятора охлаждения следует использовать их статические характеристики.

3. Синтез КР, состоящего из последовательно включенных двух изодромных звеньев, обеспечивающих астатизм второго порядка и структурную устойчивость АСУТ ТАД, а также звеньев обратной связи, обеспечивающих необходимый уровень запаса устойчивости и показателей качества процесса управления линеаризованной модели, обеспечил определение параметров звеньев, входящих в состав регулятора.

4. Сравнение переходных процессов в системе АСУТ ТАД с КР и ПИ-регулятором, параметры которого были выбраны методом технического оптимума, позволяет рекомендовать применение КР, обеспечивающего лучшие показатели качества процесса управления на линеаризованной и нелинейной моделях.

5. Проверка работы АСУТ ТАД с КР для нелинейной модели также подтверждает целесообразность его применения в связи с лучшими значениями показателей качества процесса управления.

6. Экспериментальная установка, содержащая вентилятор охлаждения, который приводится во вращение асинхронным двигателем, управляемого преобразователем частоты, охлаждаемый асинхронный двигатель (физическая модель

ТАД тепловоза), который также управляется преобразователем частоты, обеспечивает возможность отработки алгоритмов управления.

7. Проведенный расчет технико-экономической эффективности применения разработанной АСУТ ТАД показал, что при среднем удельном расходе топлива $0,208 \text{ кг/кВт}\cdot\text{ч}$ экономия топлива в случае применения электропривода с частотно-управляемым асинхронным двигателем составит 11300 кг в год на систему охлаждения тяговых электродвигателей по сравнению с релейной системой управления.

8. Перспективами дальнейшей разработки темы диссертации являются переход с позиционных систем управления приводом вращения ВО ТАД к САУ и внедрение их на отечественный подвижной состав железных дорог, а также использование КР для большинства типов САУ, применяемых на локомотивах.

Основные положения диссертации опубликованы:

а) в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Бондаренко, Д.А. Комплексная физическая модель тягового электропривода с асинхронными двигателями / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, А.В. Самотканов, Д.А. Бондаренко // Наука и техника транспорта. – 2014. – №3. – С. 31 – 38.

2. Бондаренко, Д.А. Комплексная установка для исследования автоматических систем охлаждения асинхронных тяговых двигателей / Д.А. Бондаренко // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – №2. – С. 22 – 25.

3. Бондаренко, Д.А. Результаты экспериментальных исследований тепловых процессов в асинхронном двигателе / А.А. Пугачев, Д.А. Бондаренко // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – №3. – С. 17 – 23.

4. Бондаренко, Д.А. Математическая модель установившихся тепловых процессов в асинхронном двигателе / В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, Д.А. Бондаренко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – №5-2. – С. 221 – 226.

б) патенты:

5. Патент на полезную модель 148359 РФ, МПК G01M17/00. Стенд для моделирования динамических процессов в тяговом приводе локомотивов с электропередачей / Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Самотканов А.В., Пугачев А.А., Воробьев Д.В., Бондаренко Д.А.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения» МГУПС (МИИТ). – № 2014113138/11; заявл. 04.04.2014. – 4 с.: ил.

6. Патент на полезную модель 156446 РФ, МПК G01M17/08. Стенд для моделирования динамических процессов в тяговом приводе локомотивов с электропередачей / Воробьев В.И., Космодамианский А.С., Антипин Д.Я., Измеров О.В., Пугачев А.А., Бондаренко Д.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет». – № 2015109745/11; заявл. 19.03.2015. – 4 с.: ил.

в) в других изданиях и материалах конференций:

7. Бондаренко, Д.А. Частотно управляемый привод вентилятора охлаждения двигателя внутреннего сгорания / Г.С. Михальченко, В.И. Воробьев, Д.А. Бондаренко // Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр. – Брянск: БГТУ, 2013. – С. 194 – 199.

8. Бондаренко, Д.А. Минимизация мощности потерь электропривода с асинхронным двигателем / А.А. Пугачев, А.С. Космодамианский, Д.А. Бондаренко // Энерго- и ресурсосбережение XXI век.: материалы XI международной научно-практической интернет-конференции, 01 марта – 30 июня 2013 г., г. Орёл / Под редакцией д-ра техн. наук, проф. В.А. Голенкова, д-ра техн. наук, проф. А.Н. Качалова, д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Степанова. – Орёл: Госуниверситет-УНПК, 2013. – С. 89 – 92.

9. Бондаренко, Д.А. Автоматический комбинированный регулятор температуры энергетической установки транспортного средства / В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, Д.А. Бондаренко // Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр. – Брянск: БГТУ, 2013. – С. 207 – 214.

10. Бондаренко, Д.А. Комплексная установка для моделирования динамических процессов в тяговом приводе локомотива с электропередачей / Д.А.

Бондаренко // VII конференция «Будущее машиностроения России». 24–27 сентября, МГТУ им. Баумана, г. Москва – 2014 г., С. 219 – 220.

11. Бондаренко, Д.А. Расчет сопротивлений эквивалентной тепловой схемы замещения асинхронного двигателя / А.А. Пугачев, Д.А. Бондаренко // Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр. – Брянск: БГТУ, 2015. – 263 с. – С. 205 – 218.

12. Бондаренко, Д.А. Привод вентилятора охлаждения асинхронного двигателя локомотива / Д.А. Бондаренко // Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр. – Брянск: БГТУ, 2015. – 263 с. – С. 219 – 224.

13. Бондаренко, Д.А. Результаты расчета тепловых процессов в асинхронном двигателе / А.А. Пугачев, Д.А. Бондаренко // Электропривод, электро-технологии и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов II Международной (V Всероссийской) научно-технической конференции – Уфа: Издательство УГНТУ, 2015. – С. 220 – 223.

Бондаренко Денис Андреевич

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ
ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ТЕПЛОВОЗА

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Подписано в печать ____ . ____ . 2018 Заказ № _____ Формат 60X90/16
Усл. печ. л. – 1,5 Тираж 80 экз.
